

# 挤压处理下组织化核桃蛋白品质变化

张佳宁<sup>1,2</sup>, 王陈艳<sup>1,3</sup>, 郝艳宾<sup>1,4</sup>, 张贇齐<sup>1,4</sup>, 田益玲<sup>2</sup>, 丁保森<sup>3</sup>, 齐建勋<sup>1,4\*</sup>, 陈永浩<sup>1,4\*</sup>

(1. 北京市农林科学院林业果树研究所, 北京 100093) (2. 河北农业大学食品科技学院, 河北保定 071001)  
(3. 长江大学生命科学学院, 湖北荆州 434025) (4. 北京市落叶果树工程技术研究中心, 北京 100093)

**摘要:** 作为核桃制油副产物的核桃蛋白是一种优质植物蛋白, 核桃蛋白高值化利用, 对核桃产业可持续发展具有重要意义。该研究采用挤压法对核桃蛋白进行组织化, 考察挤压工艺参数对组织化核桃蛋白色泽、质构特性和组织化度的影响。通过采用单因素法, 研究了挤压温度、水分含量、螺杆转速、喂料速度和冷却温度5个挤压工艺参数对组织化核桃蛋白的影响。根据单因素试验结果, 选择挤压温度、水分含量和喂料速度三个参数为响应面实验的试验因素, 以组织化度为响应值, 应用响应面分析法对挤压工艺参数进行优化, 得到了最优挤压工艺参数为挤压温度141℃, 水分含量52.7%, 螺杆转速160 r/min, 喂料速度26 g/min, 冷却温度65℃, 此时组织化度为1.209。该研究为核桃蛋白基素肉开发奠定了基础。

**关键词:** 核桃蛋白; 挤压工艺; 组织化; 响应面法; 参数优化

文章编号: 1673-9078(2024)05-199-211

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.5.0436

## Quality Changes of Organized Walnut Protein under Extrusion Treatment

ZHANG Jianing<sup>1,2</sup>, WANG Chenyan<sup>1,3</sup>, HAO Yanbin<sup>1,4</sup>, ZHANG Yunqi<sup>1,4</sup>, TIAN Yiling<sup>2</sup>,

DING Baomiao<sup>3</sup>, QI Jianxun<sup>1,4\*</sup>, CHEN Yonghao<sup>1,4\*</sup>

(1. Institute of Forestry and Pomology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100093, China) (2. College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)  
(3. College of Life Sciences, Yangtze University, Jingzhou 434025, China)  
(4. Beijing Engineering Research Center for Deciduous Fruit Trees, Beijing 100093, China)

**Abstract:** Being a by-product of walnut oil production, walnut protein is a high-quality plant protein. The high-value utilization of walnut protein is of great significance to the sustainable development of the walnut industry. The effects of extrusion parameters on the color, texture characteristics, and degree of organization of walnut protein were investigated. The effects of five extrusion process parameters, including the extrusion temperature, moisture content, screw speed, feeding speed, and cooling temperature, were studied through single-factor analysis. According to the data obtained, three parameters, namely the extrusion temperature, moisture content, and feeding speed, were selected as test factors in surface response experiments, whereas the degree of organization was defined as the response factor. The optimal extrusion parameters were

引文格式:

张佳宁,王陈艳,郝艳宾,等.挤压处理下组织化核桃蛋白品质变化[J].现代食品科技,2024,40(5):199-211.

ZHANG Jianing, WANG Chenyan, HAO Yanbin, et al. Quality changes of organized walnut protein under extrusion treatment [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(5): 199-211.

收稿日期: 2023-04-11

基金项目: 北京市农林科学院科技创新能力建设项目(KJCX20210406); 新疆维吾尔自治区重点研发计划(2022B02048-2)

作者简介: 张佳宁(1999-),女,硕士研究生,研究方向:核桃蛋白综合利用研究,E-mail: jianingzhang2022@163.com

通讯作者: 齐建勋(1974-),男,博士,副研究员,研究方向:核桃种质资源评价与品种选育,E-mail: qjx@263.net; 共同通讯作者: 陈永浩(1979-),男,博士,副研究员,研究方向:核桃深加工与高值化利用研究,E-mail: cyh2010@126.com

determined as follows: an extrusion temperature at 141 °C, a moisture content of 52.7%, screw speed of 160 r/min, feeding speed of 26 g/min, and a cooling temperature of 65 °C. These conditions yielded a degree of organization of 1.209. This research lays the foundation for the development of walnut protein-based vegetarian meat.

**Key words:** walnut protein; extrusion process; organization; response surface methodology; parameter optimization

核桃又名胡桃，在我国有几千年的栽培历史，是我国重要的木本粮油树种。核桃仁富含 18 种氨基酸，并且相关必需氨基酸配比符合人体需求<sup>[1]</sup>。谷氨酸、精氨酸和天冬氨酸在核桃果仁中含量较高<sup>[2]</sup>，容易被人体消化吸收<sup>[3]</sup>。核桃除坚果、果仁等产品形态以外，主要用于制备核桃油。核桃粕——核桃油加工副产物，含有 58%（质量分数）的蛋白质<sup>[4]</sup>。以冷榨方式制油获得的核桃粕，核桃蛋白不存在变性问题，这使核桃蛋白产品开发成为可能，延伸产业链，带动核桃产业可持续发展。

组织化植物蛋白是人造肉的一种，也称“植物肉”。由于具有与动物肉类相似的肌肉纤维结构、高吸水能力和高持水能力，组织化植物蛋白由此具备模拟或代替动物肉制品的潜质<sup>[5]</sup>，既能满足人民对肉制品的感官及营养需要，还能减轻环境污染的压力。纺丝法、热剪切法和挤压法作为现今已知加工组织化蛋白普遍手段，各有千秋。纺丝法对环境不友好，制备过程中会用到化学溶剂<sup>[6]</sup>，而在食品中有些溶剂是不适用的；剪切技术虽然对环境无污染，但连续化的生产问题尚未解决<sup>[7]</sup>；挤压工艺是目前植物基肉制品生产中最为常见的加工工艺<sup>[8]</sup>，如大豆蛋白和豌豆蛋白通过挤压处理得到高水分肉类类似物<sup>[9]</sup>。市场上很多肉类模拟产品都是以大豆和小麦蛋白为原料，大豆蛋白和小麦面筋是已有且研究较成功的蛋白模拟肉原料，而鹰嘴豆、蚕豆、扁豆、绿豆等是新兴的植物肉蛋白来源<sup>[10]</sup>。

组织蛋白的性质极大程度上受挤压工艺影响，蛋白含水量以及挤压工艺中温度、机器转速和单位时间进料量等是主要考察的工艺参数<sup>[11]</sup>。经过挤压组织化处理后，组织化蛋白在会在色泽、硬度、弹性咀嚼度、组织化度、持水性和持油性等方面产生显著变化，可选择其品质特性进行测定，进而探索最优挤压工艺<sup>[12]</sup>。朱嵩<sup>[13]</sup>研究发现螺杆转速与弹性呈正相关，挤压过程中温度、转速及投料速率与组织化蛋白硬度呈正相关。杨勇等<sup>[14]</sup>将高水分挤压技术作用于大豆蛋白-淀粉素肉的制备，发现挤压参数与肉制品的持水持油性显著相关。挤压过程还可能对产品的生物活性、营养价值等产生一定影响。

挤压过程有助于活性肽的释放，活性肽和组织化蛋白在体内的酶解产物对机体有一定的生理活性<sup>[15,16]</sup>，延缓氧化、抑制血压升高等活性<sup>[17,18]</sup>。目前，将挤压法应用在核桃蛋白组织化中的研究尚鲜见报道，本研究或可为核桃蛋白组织化开发利用提供理论和技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

原料核桃蛋白（实验室自制，以香玲核桃冷榨粕为原料分离制得），其水分含量为 7.9%，粗蛋白含量为 65.87%，粗脂肪含量为 1.7%，粗纤维含量为 2.74%，灰分含量为 6.27%。

### 1.2 仪器与设备

Twin Lab F-20/40 双螺杆挤压机，德国 Brabender 公司；TAXT-Plus 物性仪，英国 SMS 公司；CM-5 色差仪，柯尼卡美能达公司；JA1003 分析天平，上海越平科学仪器有限公司；LD4-40 离心机，北京京立离心机有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 单因素试验设计

挤压温度主要指挤压机蒸煮区（4 区）和加热环（5 区）的温度，前 3 区的温度设置为 60、90、110 °C。以核桃蛋白为原料，分别考察不同挤压工艺条件（挤压温度、水分含量、螺杆转速、喂料速度、冷却温度）对组织化核桃蛋白色泽、质构特性、组织化度和持水性持油性的影响。挤压工艺参数：挤压温度 140 °C，喂料速度 20 g/min、螺杆转速 200 r/min，水分含量 55%，冷却温度 70 °C。挤压工艺单因素试验时，各因素水平设置如下：挤压温度 130、135、140、145、150 °C；喂料速度 20、22.5、25、27.5、30 g/min；螺杆转速 160、180、200、220、240 r/min；水分含量（质量分数，g/100 g，后文同）45%、47.5%、50%、52.5%、55%；冷却温度 50、55、60、65、70 °C。

### 1.3.2 响应面法优化实验

组织化蛋白的评价中,组织化度越高,且质地较软富有弹性颜色亮白的组织化蛋白质品质最好。基于单因素试验,以组织化度为主要指标,综合质构特性、色泽、持水性和持油性,确定响应面因素。在单因素试验中发现,虽然冷却温度对组织化度有显著影响,但在低温下得到的产品品质较差,质地较硬,表面有裂缝,组织化度较低,且对持水性持油性无明显影响,故不将冷却温度作为响应面因素。螺杆转速较高时得到的产品成型差,组织化度低,且对质构和色泽的影响较其他因素小,故不将螺杆转速作为响应面因素。最终选取挤压温度、水分含量和喂料速度为 Box-Behnken 中心组合试验设计的试验因素,以组织化核桃蛋白的组织化度为响应值,通过响应曲面进行分析(Response Surface Analysis, RSA)对组织化核桃蛋白的挤压工艺进行优化。其中各自变量因素水平如表 1 所示。螺杆转速为 160 r/min,冷却温度为 65 ℃,其余挤压参数同 1.3.1。

表 1 响应面因素表

Table 1 Response surface experimental factors level table

水平	A 挤压温度/℃	B 水分含量/%	C 喂料速度/(g/min)
-1	135	50	22.5
0	140	52.5	25
1	145	55	27.5

### 1.3.3 组织化核桃蛋白色泽测定

色泽采用色差仪( $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 表色系)测定,测定 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $\Delta E$ ,重复测定 3 次取平均值。 $L^*$ 为明度指数, $a^*$ 和 $b^*$ 值为彩度指数, $\Delta E$ 代表样品与白板之间的色差,差值越大说明其与白板间的差异越大<sup>[19]</sup>,代表颜色越深、越暗。平行测定 3 次,取平均值。 $\Delta E$ 计算公式如下:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_s^*)^2 + (a^* - a_s^*)^2 + (b^* - b_s^*)^2} \quad (1)$$

式中:

$L_s^*$ 、 $a_s^*$ 、 $b_s^*$ —标准白色板的测定值,分别为 96.44、-0.12、-0.20。

### 1.3.4 组织化核桃蛋白硬度、弹性、咀嚼度测定

将样品剪切成边长 5 mm×5 mm×10 mm 的方块,物性仪工作条件为:TPA 模式,探头 P/36R,触发力为 5 g,测试前、中、后速度分别为 2、1、2 mm/s,两次下压间隔时间为 5 s,形变程度

50%<sup>[20]</sup>。平行测量 5 次,取平均值。

### 1.3.5 组织化核桃蛋白的组织化度测定

将样品剪切成图 1 所示,物性仪的工作条件为:剪切模式,探头 A/CKB,测试前、中、后速度分别为 2、1、2 mm/s,剪切程度 75%。每个样品测定 1 次,平行测定 3 次,取平均值。横向剪切力与纵向剪切力的比值即为组织化度。

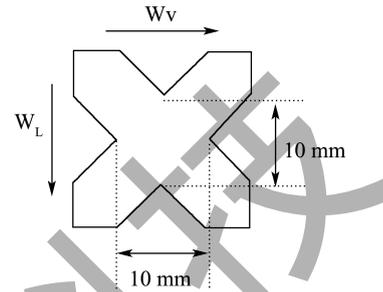


图 1 组织化度剪切样品示意图

Fig.1 Sample shape for texturization degree

### 1.3.6 组织化核桃蛋白持水性和持油性的测定

持水性测定,将 1 g 样品与 10 mL 蒸馏水混合,充分混匀,然后在 30 ℃下放置 30 min,并以 3 000 r/min 离心 30 min。倒出上清液,控干多余水分<sup>[21]</sup>,平行测定 3 次,取平均值。计算公式如下:

$$h = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (2)$$

式中:

$h$ —持水性, g/g;

$m_2$ —离心后沉淀的质量, g;

$m_1$ —为样品的质量, g。

持油性测定,用大豆油代替蒸馏水,其余操作与持水性测定相同。

## 1.4 数据统计分析

通过 SPSS 22 软件对试验结果进行统计分析,Design Expert 10 软件进行响应面分析,采用 Origin 2018 软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 挤压工艺对组织化核桃蛋白色泽的影响

如图 2 所示,挤压温度对组织化核桃蛋白的色泽参数 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $\Delta E$ 有显著性影响( $P < 0.05$ )。随着挤压温度升高, $L^*$ 先升高再降低再升高,在 150 ℃时最高为 36.32,在 140 ℃时最低为 29.24;

$a^*$  和  $b^*$  在 130 °C 时最高, 分别为 9.47、19.10, 在 140 °C 时最低, 分别为 7.54、12.76。  $L^*$  值的大小代表组织化核桃蛋白的亮度,  $\Delta E$  值的大小代表组织化核桃蛋白的白度。核桃蛋白组织化后处理后, 颜色发生较大变化, 这可能是由于物料中除蛋白外, 还含有少量残存的内种皮多酚, 少量纤维素等碳水化合物, 在高温进行挤压蒸煮过程中, 高温引发了酚类物质的非酶褐变, 同时蛋白的大量存在和部分碳水化合物的存在以及挤压过程中产生的高温也为美拉德反应产生棕色大分子物质提供了必要条件, 另外, 高温下物料中的碳水化合物也会发生焦糖化反应, 多重反应综合作用导致挤压制备的核桃蛋白组织化产品色泽加深<sup>[22]</sup>。

如图 3 所示, 水分含量对组织化核桃蛋白的色泽参数  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $\Delta E$  影响显著 ( $P < 0.05$ )。随着水分含量的增加,  $L^*$  呈先下降后上升趋势, 在水分含量为 52.5% 时  $L^*$  最大为 29.48, 水分含量接着增加,  $L^*$  有下降趋势。色差  $\Delta E$  与  $L^*$  变化趋势相反, 在水分含量为 52.5% 时,  $\Delta E$  最小为 68.64。  $a^*$  逐渐增加, 在水分含量为 55% 时, 达到最大值 7.43。表明水分含量可以改善组织化蛋白的色泽, 这是由于随着水分含量增加, 物料粘度降低, 缩短了物料在

机筒内的停留时间, 降低了发生多重非酶褐变反应的程度, 因此核桃蛋白组织化产品颜色变浅。

如图 4 所示, 螺杆转速对组织化核桃蛋白的色泽参数  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $\Delta E$  影响显著 ( $P < 0.05$ )。当螺杆转速为 180 r/min 时,  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值最大, 分别为 37.49、8.01、17.67, 此时  $\Delta E$  最小, 为 62.14。当螺杆转速为 200 r/min 时,  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值最小, 分别为 29.24、7.43、13.09,  $\Delta E$  最大, 为 68.92。螺杆转速增加, 物料在机筒内的滞留时间缩短, 所以物料颜色变浅。同时, 随着螺杆转速的增加, 剪切力逐渐增加, 组分的改变受到剪切力的影响, 在多种因素的影响下, 导致挤出物的色泽有变化较为复杂<sup>[23]</sup>。

如图 5 所示, 喂料速度对组织化核桃蛋白的色泽参数  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $\Delta E$  影响显著 ( $P < 0.05$ )。随着喂料速度增加,  $L^*$  先增加再缓慢减小再增加,  $a^*$  和  $b^*$  与  $L^*$  变化趋势大致相同,  $\Delta E$  与  $L^*$  变化趋势相反。喂料速度为 30 g/min 时,  $L^*$  值最高为 38.43; 喂料速度为 27.5 g/min 时,  $a^*$  值和  $b^*$  值最高, 分别为 8.47、20.55。喂料速度增加会使物料的粘度下降, 使其在机筒中的滞留时间缩短, 发生非酶褐变反应的时间缩短, 从而挤出物的颜色变淡。

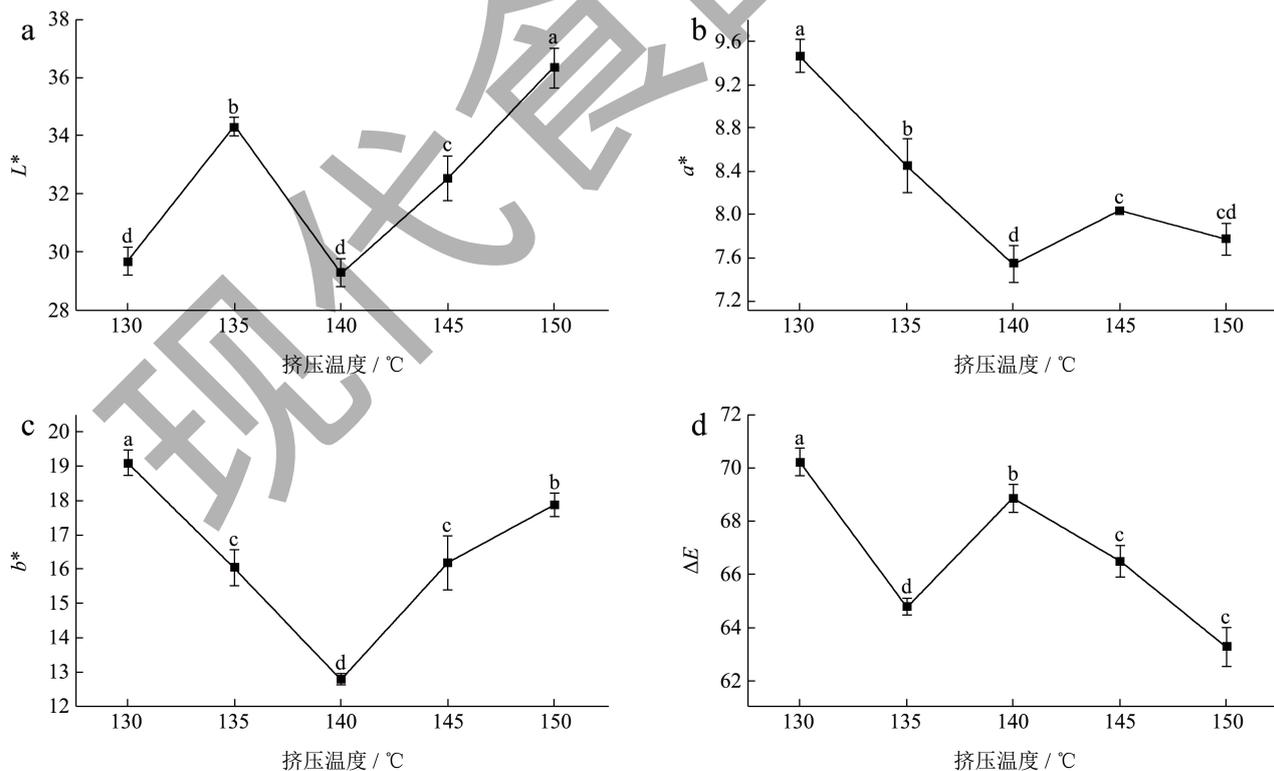


图 2 挤压温度对组织化核桃蛋白色泽的影响

Fig.2 Effect of extrusion temperature on color of textured walnut protein

注: 不同字母代表差异显著 ( $P < 0.05$ ), 图 2~ 图 12 同。

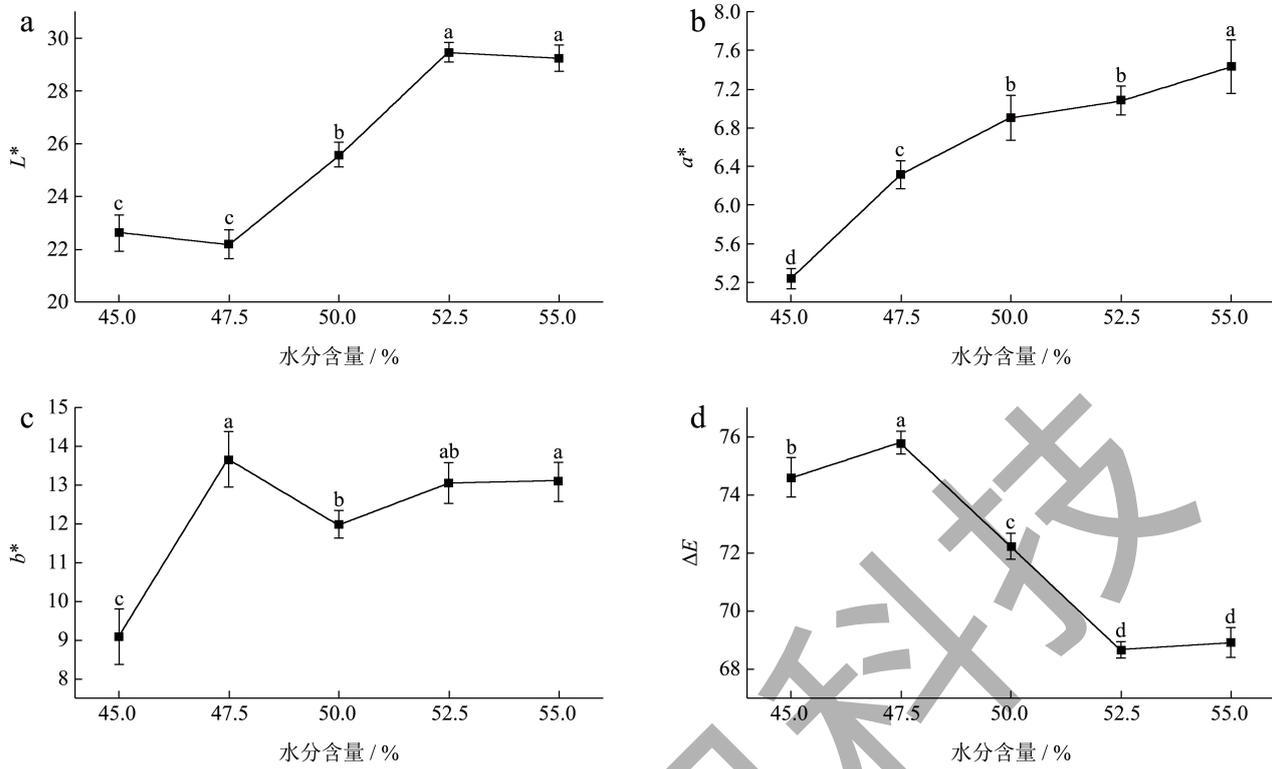


图3 水分含量对组织化核桃蛋白色泽的影响

Fig.3 Effect of moisture content on color of textured walnut protein

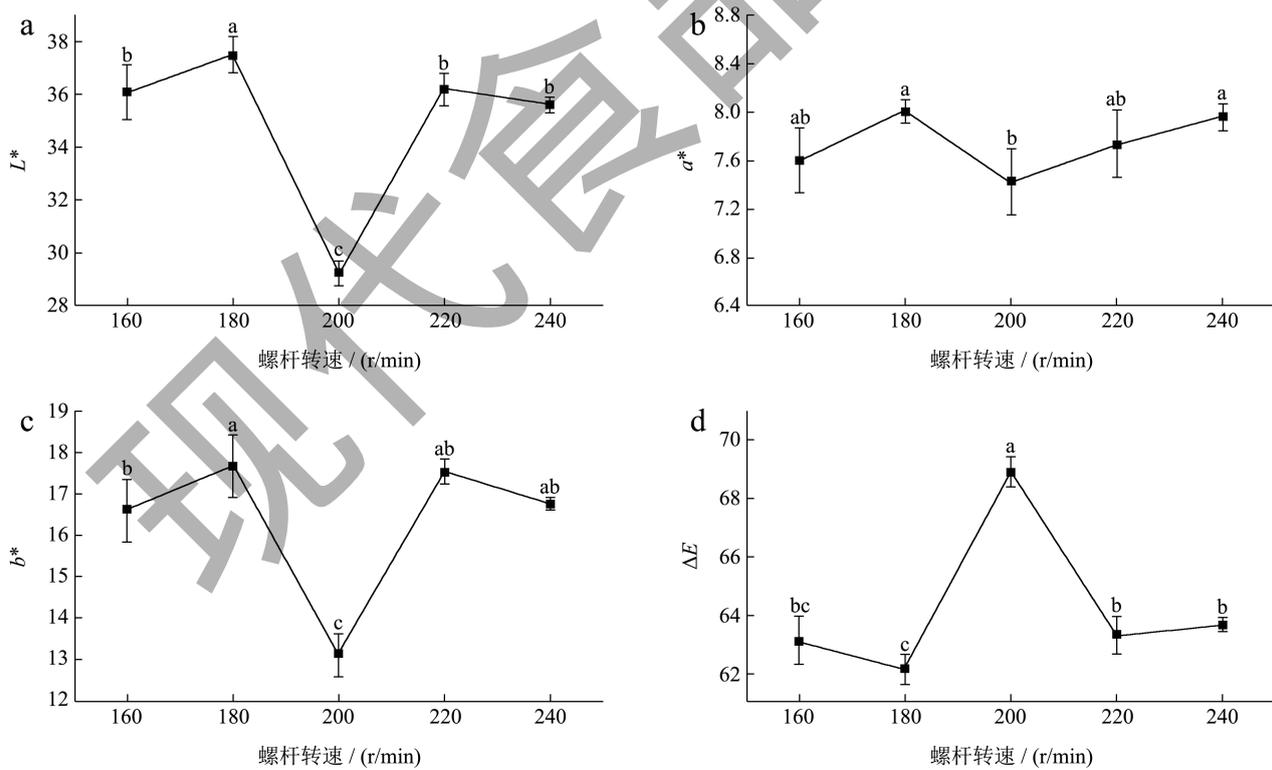


图4 螺杆转速对组织化核桃蛋白色泽的影响

Fig.4 Effect of screw speed on color of textured walnut protein

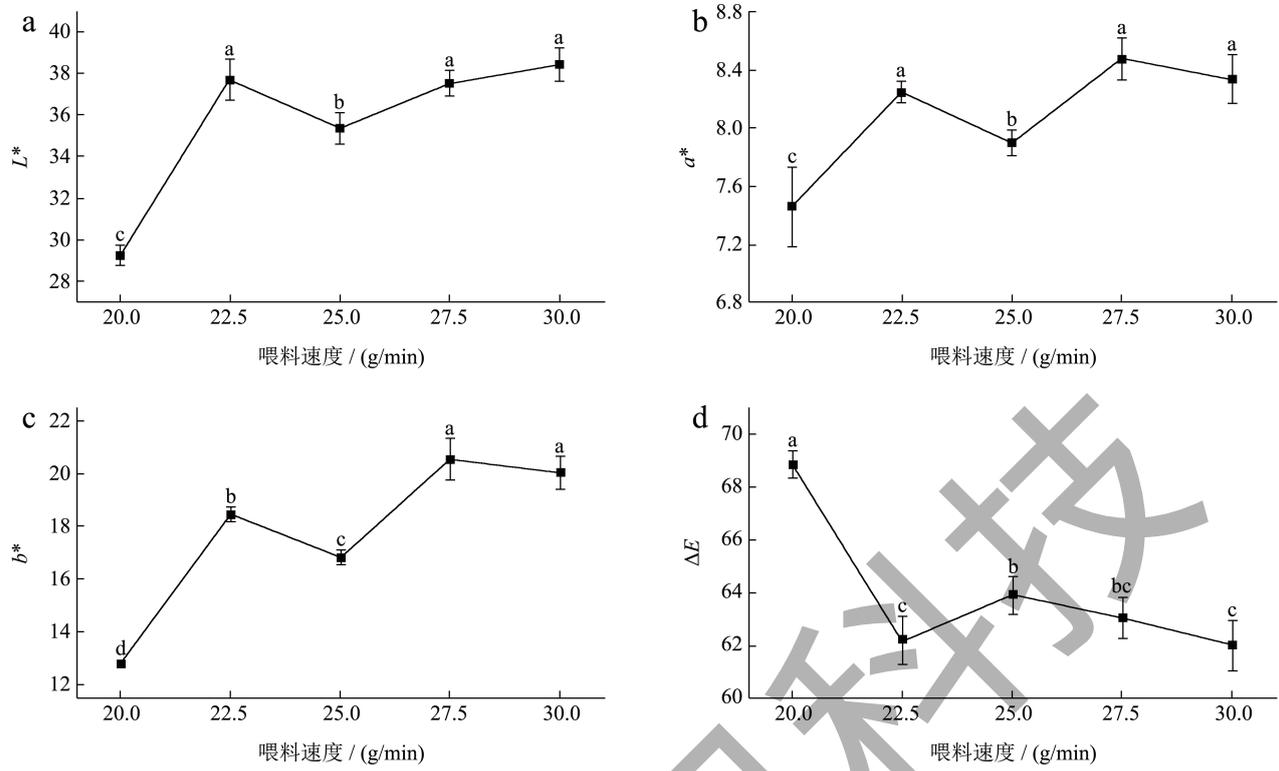


图5 喂料速度对组织化核桃蛋白色泽的影响

Fig.5 Effect of feeding speed on color of textured walnut protein

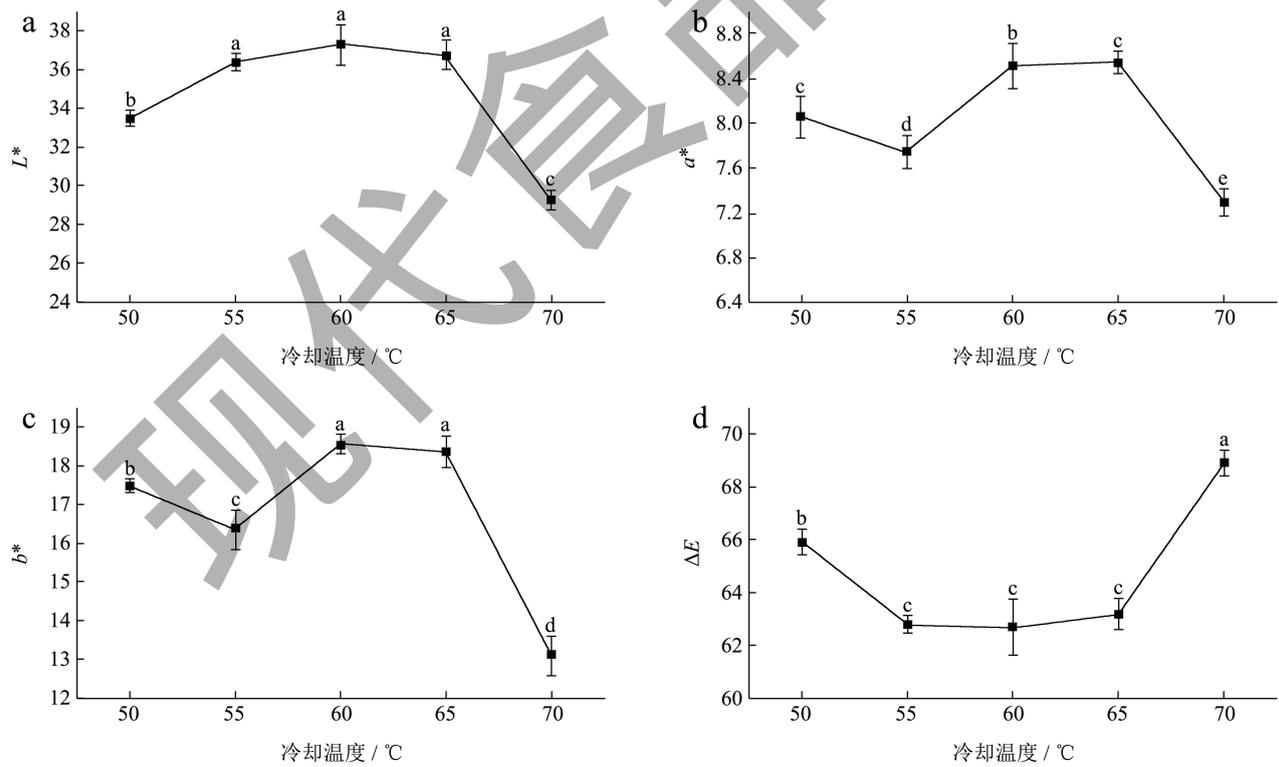


图6 冷却温度对组织化核桃蛋白色泽的影响

Fig.6 Effect of cooling temperature on color of textured walnut protein

如图 6 所示, 冷却温度对组织化核桃蛋白的色泽参数  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $\Delta E$  影响显著 ( $P < 0.05$ )。随着冷却温度升高,  $L^*$  先升高后降低,  $a^*$  和  $b^*$  先降低后升高再降低,  $\Delta E$  变化趋势与  $L^*$  相反。冷却温度为 60 °C 时,  $L^*$  最高为 37.26,  $b^*$  最高为 18.55,  $\Delta E$  最低为 62.68。65 °C 时,  $a^*$  最高为 8.54。物料经冷却模口冷却, 有利于纤维形态产生, 适宜的冷却温度有利于组织化蛋白产生, 同时适宜冷却温度可以及时改变发生非酶褐变反应环境温度, 终止反应的进行, 从而使得到的核桃蛋白组织化产品颜色变浅。

### 2.2 挤压工艺对组织化核桃蛋白质构特性的影响

如表 2 所示, 挤压温度对组织化核桃蛋白硬度、咀嚼度均有显著影响 ( $P < 0.05$ ), 对弹性的影响则不明显 ( $P > 0.05$ )。硬度、咀嚼度随着挤压温度逐渐的增加而增加, 而弹性有下降趋势但变化不明显, 在 0.90~0.94 范围内变化。挤压温度为 130 °C 时, 硬度和咀嚼度最小, 分别为 1 726.65 g 和 1 100.89 g, 当挤压温度升高到 145~150 °C 时, 硬度、咀嚼度增加不显著, 150 °C 时硬度和咀嚼度最大, 分别为 3 538.69 g 和 2 238.48 g, 挤压温度的升高使物料更加充分的熔融, 蛋白质变性展开, 蛋白质交联成网络结构, 稳定性提高, 挤出物的硬度和咀嚼度增大<sup>[24]</sup>。

表 2 挤压温度对组织化核桃蛋白质构特性的影响  
Table 2 Effect of extrusion temperature on textural properties of textured walnut protein

挤压温度/°C	硬度/g	弹性	咀嚼度/g
130	1 726.65 ± 248.89 <sup>c</sup>	0.94 ± 0.02 <sup>a</sup>	1 100.89 ± 76.63 <sup>c</sup>
135	1 982.96 ± 199.42 <sup>b</sup>	0.94 ± 0.02 <sup>a</sup>	1 305.21 ± 151.98 <sup>bc</sup>
140	2 257.73 ± 168.72 <sup>b</sup>	0.93 ± 0.01 <sup>a</sup>	1 510.03 ± 21.44 <sup>b</sup>
145	3 333.43 ± 217.73 <sup>a</sup>	0.93 ± 0.01 <sup>a</sup>	2 219.20 ± 197.59 <sup>a</sup>
150	3 538.69 ± 123.30 <sup>a</sup>	0.90 ± 0.02 <sup>a</sup>	2 238.48 ± 97.89 <sup>a</sup>

注: 不同字母代表差异显著 ( $P < 0.05$ ), 表 2~6 同。

如表 3 所示, 水分含量对组织化核桃蛋白的硬度、咀嚼度均有显著影响 ( $P < 0.05$ ), 而对弹性得影响不明显 ( $P > 0.05$ )。随着水分含量的逐渐升高, 组织化核桃蛋白的硬度显著降低, 弹性则略微增加, 咀嚼度显著降低。水分含量为 45% 时, 硬度最高为 4 790.70 g, 咀嚼度最高为 3 000.30 g, 此时弹性最小为 0.88。水分含量增加到 55% 时, 组织化核

桃蛋白的硬度和咀嚼度最小, 分别为 2 257.73 g 和 1 510.03 g, 此时弹性最大为 0.93。随着水分含量的升高, 物料逐渐被稀释, 蛋白分子间的空间距离加大, 交联网状结构逐渐松散, 形成难度增加, 挤出物质也趋于柔软, 组织化蛋白的咀嚼度降低<sup>[25]</sup>。

表 3 水分含量对组织化核桃蛋白质构特性的影响  
Table 3 Effect of moisture content on textural properties of textured walnut protein

水分含量/%	硬度/g	弹性	咀嚼度/g
45	4 790.70 ± 231.86 <sup>a</sup>	0.88 ± 0.01 <sup>a</sup>	3 000.30 ± 163.55 <sup>a</sup>
47.5	3 733.55 ± 131.07 <sup>b</sup>	0.89 ± 0.01 <sup>a</sup>	2 356.31 ± 82.91 <sup>b</sup>
50	3 397.66 ± 229.6 <sup>b</sup>	0.90 ± 0.02 <sup>a</sup>	2 266.77 ± 278.12 <sup>b</sup>
52.5	2 900.35 ± 286.55 <sup>c</sup>	0.90 ± 0.01 <sup>a</sup>	1 808.90 ± 187.9 <sup>c</sup>
55	2 257.73 ± 168.72 <sup>d</sup>	0.93 ± 0.01 <sup>a</sup>	1 510.03 ± 21.44 <sup>b</sup>

如表 4 所示, 螺杆转速对组织化核桃蛋白的硬度、咀嚼度均有显著影响 ( $P < 0.05$ )。螺杆转速越来越大, 组织化核桃蛋白的硬度和咀嚼度呈现由低到高的变化, 而弹性先降低后升高再降低。螺杆转速为 160 r/min 的情况下, 组织化核桃蛋白具有较低的硬度和咀嚼度, 分别为 1 612.32 g 和 1 073.87 g, 此时弹性最大为 0.96。螺杆转速为 220 r/min 时, 硬度和咀嚼度最大, 分别为 2 873.98 g 和 1 767.27 g。这可能是由于螺杆转速增加, 使得物料在机筒内所受到的剪切强度增加, 单位时间内物料在机筒的积存量增加, 使核桃蛋白分子的交联度、致密度增加, 致使挤出物的硬度和咀嚼度增加, 弹性到一定程度后, 随着硬度的增加逐渐降低。

表 4 螺杆转速对组织化核桃蛋白质构特性的影响  
Table 4 Effect of screw speed on textural properties of textured walnut protein

螺杆转速/(r/min)	硬度/g	弹性	咀嚼度/g
160	1 612.32 ± 73.08 <sup>c</sup>	0.96 ± 0.02 <sup>a</sup>	1 073.87 ± 46.61 <sup>b</sup>
180	2 363.34 ± 169.28 <sup>ab</sup>	0.92 ± 0.02 <sup>a</sup>	1 523.95 ± 104.18 <sup>a</sup>
200	2 257.73 ± 168.72 <sup>b</sup>	0.93 ± 0.01 <sup>a7</sup>	1 510.03 ± 21.44 <sup>a</sup>
220	2 873.98 ± 128.3 <sup>a</sup>	0.94 ± 0.03 <sup>a</sup>	1 767.27 ± 218.15 <sup>a</sup>
240	2 591.14 ± 310.37 <sup>ab</sup>	0.93 ± 0.02 <sup>a</sup>	1 538.06 ± 240.17 <sup>a</sup>

喂料速度对组织化核桃蛋白的质构特性见表 5, 由表可知, 喂料速度对硬度、咀嚼度影响显著 ( $P < 0.05$ ), 对弹性得影响则不显著 ( $P > 0.05$ )。随着喂料速度的缓慢增加, 组织化核桃蛋白的硬度和咀嚼度先略微降低再升高后骤降, 弹性变化不明显,

在 0.91~0.95 范围内波动。喂料速度为 27.5 g/min 时的硬度和咀嚼度最大,分别为 3 812.26 g 和 2 443.15 g。在较高喂料速度下,同样增加了单位时间内机筒中物料的量,使咀嚼度降低<sup>[26]</sup>,所以喂料速度应低于 30 g/min。

表 5 喂料速度对组织化核桃蛋白质构特性的影响

Table 5 Effect of feeding speed on textural properties of textured walnut protein

喂料速度/(g/min)	硬度/g	弹性	咀嚼度/g
20	2 257.73 ± 168.72 <sup>c</sup>	0.93 ± 0.01 <sup>a</sup>	1 510.03 ± 21.44 <sup>c</sup>
22.5	1 863.91 ± 145.38 <sup>c</sup>	0.93 ± 0.01 <sup>a</sup>	1 234.24 ± 152.81 <sup>d</sup>
25	3 173.27 ± 179.20 <sup>b</sup>	0.93 ± 0.01 <sup>a</sup>	2 084.52 ± 89.12 <sup>b</sup>
27.5	3 812.26 ± 242.55 <sup>a</sup>	0.91 ± 0.01 <sup>a</sup>	2 443.15 ± 168.15 <sup>a</sup>
30	1 181.67 ± 84.64 <sup>d</sup>	0.95 ± 0.03 <sup>a</sup>	1 612.99 ± 135.4 <sup>c</sup>

如表 6 所示,冷却温度对组织化核桃蛋白的硬度、咀嚼度均匀显著影响 ( $P < 0.05$ ),对弹性的影响则不明显 ( $P > 0.05$ )。随着冷却温度的逐渐升高,硬度和咀嚼度先减小后增大,弹性变化不明显,在 0.90~0.93 范围内波动。冷却温度为 50 °C 时,组织化核桃蛋白的硬度和咀嚼度最大,分别为 2 589.55 g 和 1 592.83 g。低温有助于质构的形成,致使在较低温度下组织化核桃蛋白的硬度和咀嚼度较高,这与梁春艳<sup>[27]</sup>的研究结果一致。

表 6 冷却温度对组织化核桃蛋白质构特性的影响

Table 6 Effect of cooling temperature on textural properties of textured walnut protein

冷却温度/°C	硬度/g	弹性	咀嚼度/g
50	2 589.55 ± 182.17 <sup>a</sup>	0.91 ± 0.02 <sup>a</sup>	1 592.83 ± 105.42 <sup>a</sup>
55	2 551.08 ± 186.99 <sup>a</sup>	0.90 ± 0.01 <sup>a</sup>	1 591.40 ± 141.70 <sup>a</sup>
60	2 002.61 ± 194.17 <sup>c</sup>	0.92 ± 0.02 <sup>a</sup>	1 254.29 ± 140.98 <sup>b</sup>
65	1 850.72 ± 172.24 <sup>c</sup>	0.92 ± 0.03 <sup>a</sup>	1 182.77 ± 116.94 <sup>b</sup>
70	2 257.73 ± 168.72 <sup>b</sup>	0.93 ± 0.01 <sup>a</sup>	1 510.03 ± 21.44 <sup>a</sup>

### 2.3 挤压工艺对组织化核桃蛋白组织化度的影响

如图 7a 所示,挤压温度对组织化核桃蛋白的组织化度有显著影响 ( $P < 0.05$ )。随着挤压温度逐渐升高,组织化核桃蛋白的组织化度先升高后降低,挤压温度为 135 °C 的情况下,组织化度最高为 1.076。随着挤压温度升高,组织化度开始下降,140 °C 时的组织化度略微下降,与 135 °C 差异不显著。挤压

温度为 150 °C 的情况下,组织化度最低为 1.004。

如图 7b 所示,水分含量对组织化核桃蛋白的组织化度有显著影响 ( $P < 0.05$ )。随着水分含量的缓慢增加,组织化核桃蛋白的组织化度整体呈先增加后降低趋势,可能是因为蛋白质与水分子之间水合作用形成均匀的熔融体,有利于物料纤维结构的产生<sup>[28]</sup>。水分含量为 45% 的情况下,组织化度最低为 1.005,水分含量增加到 52.5% 时,组织化度达到最高值 1.142。

如图 7c 所示,螺杆转速对组织化核桃蛋白的组织化度有显著影响 ( $P < 0.05$ ),组织化度随着螺杆转速增加先降低,再略微增加后降低,可能是因为螺杆转速增加,较大的剪切力会破坏蛋白质等大分子之间已经形成的作用力,导致组织化度下降<sup>[29]</sup>。螺杆转速为 160 r/min 时,组织化度最高为 1.094。

如图 7d 所示,喂料速度对组织化核桃蛋白的组织化度有显著影响 ( $P < 0.05$ )。喂料速度为 22.5 g/min 的情况下,组织化度最高为 1.15,喂料速度为 30 g/min 的情况下,组织化度最低为 1.017。可能是因为机筒内由于喂料速度变化,压力变化影响蛋白组织化程度<sup>[30]</sup>,在喂料速度较低时,得到的挤出物组织化度最好。

如图 7e 所示,冷却温度对组织化核桃蛋白的组织化度有显著影响 ( $P < 0.05$ )。随着冷却温度的升高,组织化度先增加后降低。冷却温度为 50 °C 时,组织化度最低为 1.004,冷却温度为 65 °C 时,组织化度最高为 1.140。

### 2.4 挤压工艺对组织化核桃蛋白持水性和持油性的影响

如图 8 所示,随着挤压温度升高,组织化蛋白的持水性没有明显变化 ( $P > 0.05$ ),持油性影响显著 ( $P < 0.05$ )。随着挤压温度的升高,组织化核桃蛋白的持水性先降低后升高,在 140 °C 时持水性最低。在 130~140 °C 时,蛋白质发生变性,纤维化程度增加,结构越来越紧密,亲水性氨基酸被包裹起来导致持水性下降,在 140~150 °C 时,由于温度升高,导致水蒸气蒸发快速,形成孔状结构导致吸水增多<sup>[28]</sup>,持水性增加。145 °C 时的持水性最高为 0.58 g/g。组织化核桃蛋白的持油性先升高后降低,135 °C 时,持油性最高为 0.69 g/g。这可能是因为 135 °C 时的组织化蛋白纤维化增加,结构更紧密吸油性更强,导致持油性增加。

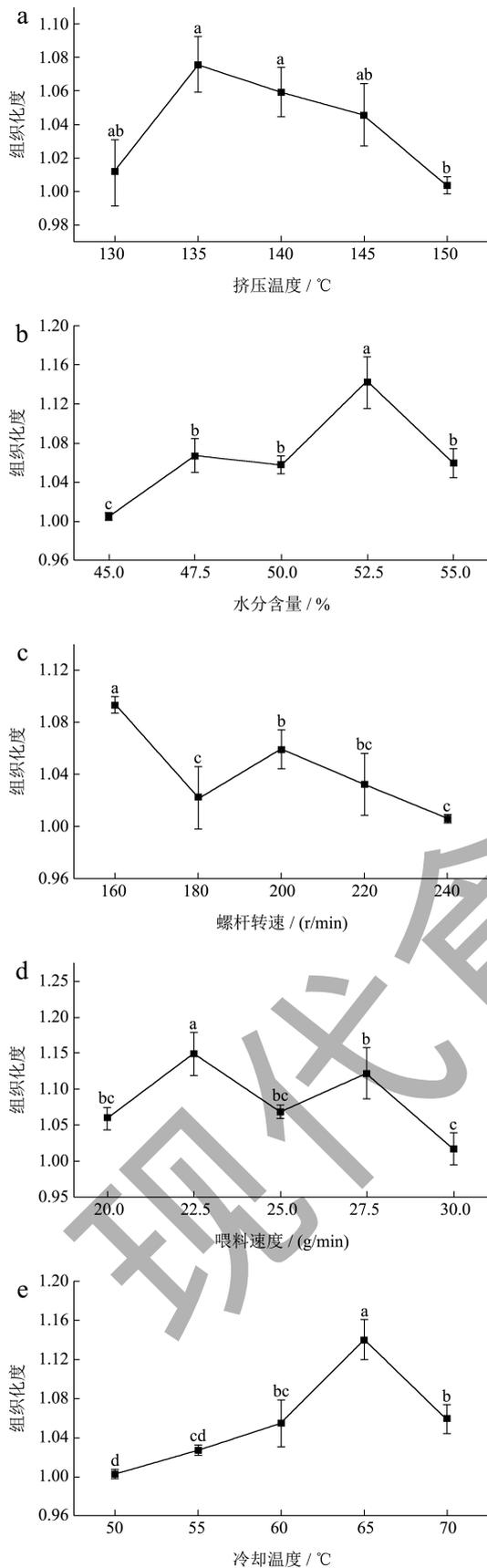


图7 挤压工艺参数对组织化核桃蛋白组织化度的影响

Fig.7 Effect of extrusion process parameters on the degree of texturization of textured walnut protein

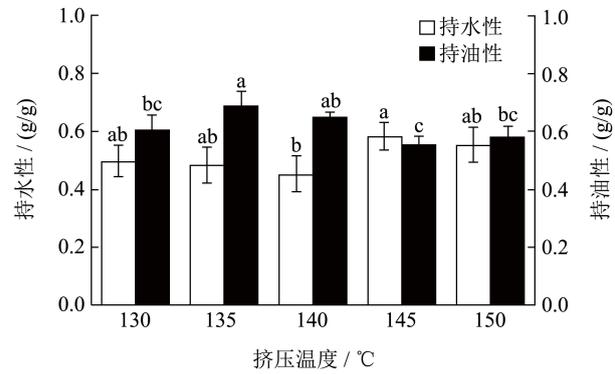


图8 挤压温度对组织化核桃蛋白持水性和持油性的影响

Fig.8 Effect of extrusion temperature on water-holding capacity and oil-binding capacity of textured walnut protein

如图9所示,水分含量对组织化核桃蛋白的持水性和持油性的影响显著 ( $P < 0.05$ )。随着水分含量的增加,组织化核桃蛋白的持水性和持油性变化呈相反趋势。含水量为45%时,组织化核桃蛋白的持水性最高,为0.62 g/g。在47.5%~52.5%时持水性增加可能是因为在挤压过程中,随着水分含量的增加,会有更多的亲水基团被暴露出来,导致持水性增加。持油性与纤维结构有关,水分含量为55%时,持油性最高,为0.65 g/g。

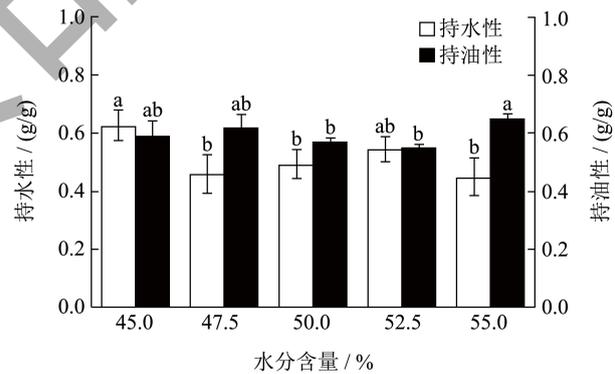


图9 水分含量对组织化核桃蛋白持水性和持油性的影响

Fig.9 Effect of moisture content on water-holding capacity and oil-binding capacity of textured walnut protein

如图10所示,螺杆转速对组织化核桃蛋白的持水性影响显著 ( $P < 0.05$ ),对持油性影响不显著 ( $P > 0.05$ )。随着螺杆转速的缓慢增加,组织化核桃蛋白的持水性呈下降趋势,转速为240 r/min时,持水性最低为0.25 g/g;组织化核桃蛋白的持油性变化不明显,转速为200 r/min时,持油性最高为0.65 g/g。螺杆转速增大,增加物料形成的剪切力,促进组织化核桃蛋白纤维形成<sup>[31]</sup>,亲水性氨基酸被包裹起来导致持水性下降。

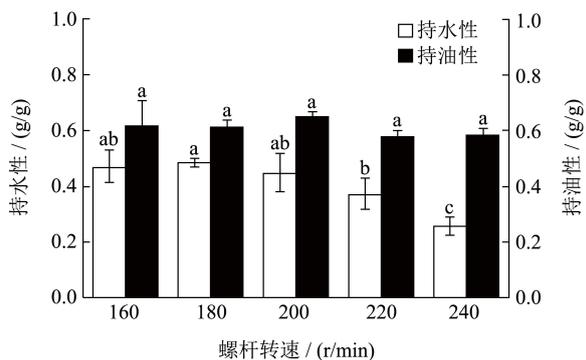


图 10 螺杆转速对组织化核桃蛋白持水性和持油性的影响

Fig.10 Effect of screw speed on water-holding capacity and oil-binding capacity of textured walnut protein

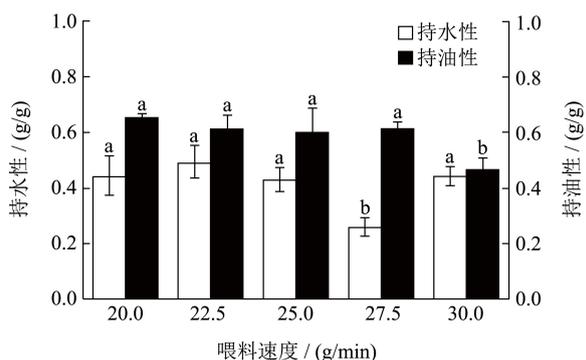


图 11 喂料速度对组织化核桃蛋白持水性和持油性的影响

Fig.11 Effect of feeding speed on water-holding capacity and oil-binding capacity of textured walnut protein

如图 11 所示，喂料速度对组织化核桃蛋白的持水性和持油性的影响呈相反作用。随着喂料速度的逐渐增加，持水性先增加后降低再增加，持油性先降低后增加再降低。喂料速度为 27.5 g/min 时，组织化核桃蛋白的持水性最低，为 0.26 g/g。喂料速度在 30 g/min 时，持油性最低为 0.47 g/min。这可能是因为喂料量过高时，物料在机筒内加热不彻底，组织化程度降低，导致持水性和持油性降低<sup>[32]</sup>。

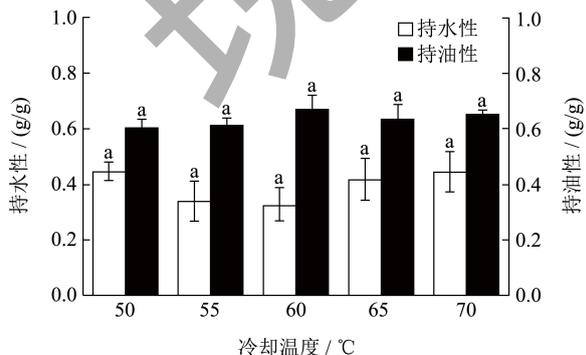


图 12 冷却温度对组织化核桃蛋白持水性和持油性的影响

Fig.12 Effect of cooling temperature on water-holding capacity and oil-binding capacity of textured walnut protein

如图 12 所示，冷却温度对组织化蛋白的持水性和持油性影响不显著 ( $P>0.05$ )。冷却温度为 60 °C 时的持水性最低、持油性最高，持水性和持油性分别为 0.32、0.67 g/g。

### 2.5 响应面优化挤压工艺

以组织化度为响应值 (Y)，进行响应面试验，试验结果如表 7。

表 7 试验结果

Table 7 Results of response surface experiment

试验号	A 挤压温度/°C	B 水分含量/%	C 喂料速度/(g/min)	R 组织化度
1	0.00	1.00	-1.00	1.067
2	0.00	0.00	0.00	1.182
3	-1.00	0.00	1.00	1.11
4	0.00	0.00	0.00	1.182
5	0.00	0.00	0.00	1.171
6	0.00	1.00	1.00	1.145
7	0.00	0.00	0.00	1.238
8	1.00	0.00	-1.00	1.13
9	0.00	0.00	0.00	1.202
10	0.00	-1.00	-1.00	1.062
11	1.00	1.00	0.00	1.114
12	0.00	-1.00	1.00	1.11
13	-1.00	1.00	0.00	1.052
14	-1.00	-1.00	0.00	1.102
15	-1.00	0.00	-1.00	1.057
16	1.00	0.00	1.00	1.17
17	1.00	-1.00	0.00	1.082

通过 Design expert 软件进行响应面分析，方差分析结果如表 8 所示。由表可知，整体模型极显著 ( $P<0.01$ )，说明该模型达到显著水平，并且失拟项不显著 ( $P>0.05$ )， $R^2$  为 0.919 7，说明回归方程拟合较好，因此可以用这个模型对组织化核桃蛋白的组织化度进行预测。一次项系数 A、C 达到显著水平 ( $P<0.05$ )，B 不显著 ( $P>0.05$ )；二次交互项  $C^2$  交互效应达到显著水平 ( $P<0.05$ )， $A^2$ 、 $B^2$  交互效应达到了极显著水平 ( $P<0.01$ )。A、B、C 三个因素对响应值的影响为： $C>A>B$ 。

对各个因素和响应值进行回归分析，得到响应值 Y (组织化度) 与各因子 (A 挤压温度、B 水分含量、C 喂料速度) 之间的回归方程为：

$$Y=1.20+0.022A+0.00275B+0.027C+0.0205AB-0.00325AC+0.0075BC-0.046A^2-0.0669B^2-0.0376C^2$$

表 8 方差分析表

Table 8 Regression analysis table

试验号	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	0.059 3	9	0.005 478	8.91	0.004 4
A	0.003 828	1	0.003 828	6.23	0.041 3
B	6.05E-005	1	6.05E-005	0.10	0.762 9
C	0.005 995	1	0.005 995	9.75	0.016 8
AB	0.001 681	1	0.001 681	2.73	0.142 2
AC	4.23E-005	1	4.23E-005	0.07	0.800 7
BC	0.000 225	1	0.000 225	0.37	0.564 3
A <sup>2</sup>	0.008 977	1	0.008 977	14.60	0.006 5
B <sup>2</sup>	0.018 859	1	0.018 859	30.68	0.000 9
C <sup>2</sup>	0.005 976	1	0.005 976	9.72	0.016 9
残差	0.004 303	7	0.000 615		
失拟向	0.001 592	3	0.000 531	0.78	0.562 4
纯误差	0.002 711	4	0.000 677 8		
总离差	0.054	16			

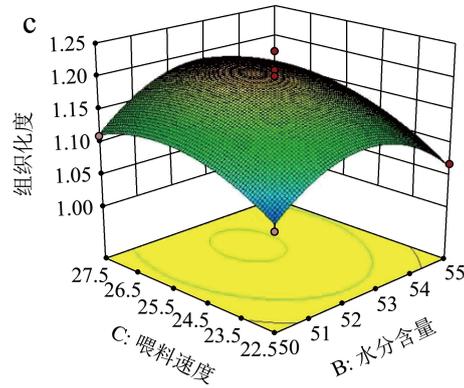


图 13 挤压工艺参数对组织化核桃蛋白组织化度的影响的三维曲面图

Fig.13 The three-dimensional surface map of effect of extrusion parameters on the degree of texturization of textured walnut protein

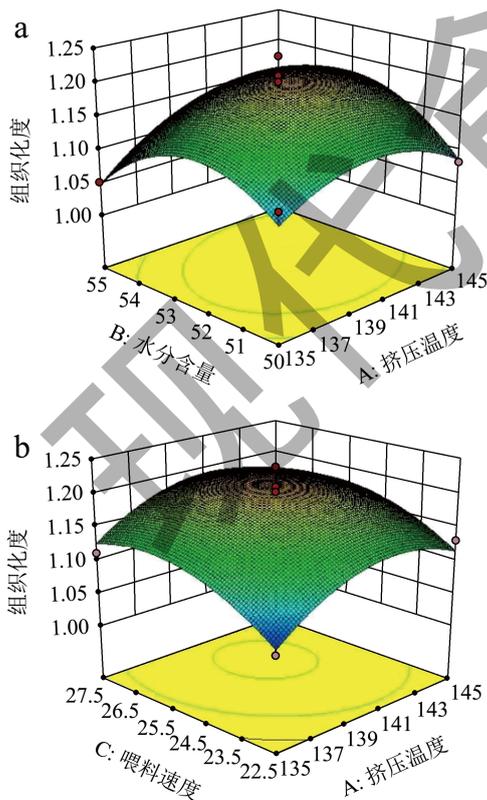
将挤压温度、水分含量和喂料速度固定，两个因素对组织化核桃蛋白的组织化度的交互作用如图 13 所示，从图可以看出，随着挤压温度升高、水分含量增加，组织化度呈先增大后减小的趋势；随着挤压温度升高、喂料速度增加，组织化度呈先增大后减小的趋势；随着水分含量和喂料速度的增加，组织化度呈先增加后降低的趋势。通过响应面实验获得组织化核桃蛋白组织化度最优的挤压工艺参数：挤压温度 141.204 °C、水分含量 52.694%、喂料速度 25.900 g/min，组织化度理论值为 1.208。基于试验操作的可行性，对响应面优化最佳工艺条件修正为：挤压温度 141 °C、水分含量 52.7%、喂料速度 26 g/min。

2.6 验证实验

以核桃蛋白为原料，挤压工艺参数设置：挤压温度 141 °C，喂料速度 26 g/min、螺杆转速 160 r/min，水分含量 52.7%，冷却温度 65 °C。此时组织化核桃蛋白的颜色较浅，硬度、咀嚼度适中，组织化度为 1.209，组织化度高，品质良好。所得挤出物的色泽、质构特性结果见表 9。

表 9 组织化核桃蛋白品质特性  
Table 9 Quality characteristics of textured walnut protein

样品	L*	a*	b*	硬度	弹性	咀嚼度	组织化度
组织化核桃蛋白	34.94	7.44	13.61	2 366.95	0.84	1 381.2	1.209



### 3 结论

通过单因素试验考察了挤压工艺对组织化核桃蛋白色泽、质构特性、组织化度和持水性持油性的影响,初步确定了挤压工艺参数,并进一步利用响应面分析法,对挤压工艺进行了优化,得到以下结论:

(1) 不同挤压工艺条件对组织化核桃蛋白的硬度、弹性、咀嚼度、组织化度、色泽、持水性、持油性有不同程度的影响,挤压温度 135~145 °C、水分含量 50%~55%、喂料速度 22.5~27.5 g/min 时的组织化核桃蛋白品质较好。

(2) 挤压温度、喂料速度对组织化度有显著影响,组织化核桃蛋白的最优挤压工艺为:挤压温度 141 °C,水分含量 52.7%,喂料速度 26 g/min、螺杆转速 160 r/min、冷却温度 65 °C,此时组织化度为 1.209。

### 参考文献

- [1] 张亭,杜倩,李勇.核桃的营养成分及其保健功能的研究进展[J].中国食物与营养,2018,24(7):64-69.
- [2] 崔莉,葛文光.核桃蛋白质功能性质的研究[J].食品科学,2000,1:13-16.
- [3] 李俊南,习学良,熊新武,等.核桃的营养保健功能及功能成分研究进展[J].中国食物与营养,2018,24(5):60-64.
- [4] LI J, WANG J, LIU C L, et al. Protein hydrolyzates from changbai mountain walnut (*Juglans mandshurica maxim*) boost mouse immune system and exhibit immunoregulatory activities [J]. Evidence-based Complementary and Alternative Medicine: eCAM, 2018, 2018: 4576561.
- [5] 许淼杰,张莹莹,栾广忠.植物蛋白高湿挤压组织化综述[J].中国粮油学报,2022,37(9):311-320.
- [6] MANSKI J M, GOOT A J, BOOM R M. Formation of fibrous materials from dense calcium caseinate dispersions [J]. Biomacromolecules, 2007, 8(4): 1271-1279.
- [7] DEKKERS B L, BOOM R M, GOOT A J. Structuring processes for meat analogues [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 81: 25-36.
- [8] ZHANG J C, MENG Z, CHENG Q L, et al. Plant-based meat substitutes by high-moisture extrusion: Visualizing the whole process in data systematically from raw material to the products [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21(8): 2435-2444.
- [9] FERAWATI F, IZALIN Z, MALIN B, et al. High-moisture meat analogues produced from yellow pea and faba bean protein isolates/concentrate: Effect of raw material composition and extrusion parameters on texture properties [J]. Foods, 2021, 10(4): 843.
- [10] DELANEY W, LI Y H, SAJID A. Chemical and physicochemical features of common plant proteins and their extrudates for use in plant-based meat [J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 131: 129-138.
- [11] 孟祥泽,吕博,付洪玲,等.单螺杆挤压技术在食品工业中的应用研究进展[J].食品研究与开发,2022,43(22):200-207.
- [12] 肖志刚,李航,王哲,等.高水分组织化复合蛋白的挤压制备及品质特性研究[J].中国粮油学报,2022,37(1):72-80,88.
- [13] 朱嵩.基于高水分挤压技术的花生蛋白素肠制备及其贮藏特性研究[D].北京:中国农业科学院,2019.
- [14] 杨勇,王中江,陈惠惠,等.大豆蛋白-淀粉基素肉制品高湿挤压工艺优化[J].中国食品学报,2019,19(12):133-144.
- [15] 付晓航,李赫,曹金诺,等.挤压加工对植物组织蛋白功能性影响的研究进展[J].食品研究与开发,2021,42(6):179-183.
- [16] PIETSCH V L, BÜHLER J M, KARBSTEIN H P, et al. High moisture extrusion of soy protein concentrate: Influence of thermomechanical treatment on protein-protein interactions and rheological properties [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 251: 11-18.
- [17] 李赫,周浩纯,张健,等.藜麦蛋白及肽的研究进展[J].食品科技,2020,45(3):43-48.
- [18] LIU Y P, WANG Q Y, LI S S, et al. Convenient food made of extruded adzuki bean attenuates inflammation and improves glycemic control in patients with type 2 diabetes: a randomized controlled trial [J]. Therapeutics and Clinical Risk Management, 2018, 14: 871-884.
- [19] 张金闯.高水分挤压过程中花生蛋白构象变化及品质调控[D].北京:中国农业科学院,2019.
- [20] 孙照勇,魏益民,张波,等.物料含水率对大豆蛋白挤压组织化产品特性的影响[J].中国粮油学报,2009,24(10):28-32.
- [21] SAMARD S, RYU G. Physicochemical and functional characteristics of plant protein-based meat analogs [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(10): e14123.
- [22] 张富重.亚临界芝麻蛋白粉挤压组织化工艺研究[D].郑州:河南工业大学,2021.
- [23] 郑建梅.谷朊粉挤压组织化技术及产品结构研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [24] BARONE J R, SCHMIDT W F, GREGOIRE N T. Extrusion of feather keratin [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 100(2): 1432-1442.
- [25] LIN S, HUFF H E, HSIEH F. Texture and chemical characteristics of soy protein meat analog extruded at high

- moisture [J]. Journal of Food Science, 2000, 65(2): 264-269.
- [26] 魏益民,赵多勇,康立宁,等.操作参数对组织化大豆蛋白产品特性的影响[J].中国粮油学报,2009,24(6):20-25.
- [27] 梁春艳.高水分挤压组织化花生蛋白制备及其应用研究[D].沈阳:沈阳师范大学,2022.
- [28] 王秋野.豌豆蛋白基植物肉的研制及特性分析[D].哈尔滨:东北农业大学,2021.
- [29] 康立宁.大豆蛋白高水分挤压组织化技术和机理研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [30] 张余.花生蛋白挤压组织化技术及其机理研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [31] FANG Y, ZHANG B, WEI Y, et al. Effects of specific mechanical energy on soy protein aggregation during extrusion process studied by size exclusion chromatography coupled with multi-angle laser light scattering [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(2): 220-225.
- [32] 李诚.小麦蛋白双螺杆挤压组织化工艺及机理研究[D].合肥:合肥工业大学,2015.

现代食品科技